

山形大学紀要(工学)第12巻 第2号 昭和48年1月
Bull. of Yamagata Univ. Eng., Vol. 12 No.2 Jan. 1973

低炭素鋼のひずみ時効異方性とバウシング効果

熊倉重典・小貫晃義・加藤康志郎

工 学 部 精密工学科

1. ま え が き

低炭素鋼のひずみ時効に関してはすでに多くの研究がなされ、それが炭素鋼中の炭素および窒素原子によって予ひずみ時に生じた転位が釘付けされること、いわゆる Cottrell 雰囲気形成によって起る現象であることが実験的にも理論的にも明らかにされている^{(1)~(8)}。しかしこの現象が予ひずみと異なる方向の変形に対してどのようにあらわれるかについてなされた研究は少ない。Tipper⁽⁹⁾ は10%の引張予ひずみを与えた 0.12% 炭素鋼の圧延板から、引張方向およびこれと直角な方向を軸として引張試験片および圧縮試験片を作り、それぞれ15分間煮沸後 250°C において30分時効した実験を行なった。その結果予ひずみと同方向の引張りに対しては明瞭な降伏現象を示して時効硬化があらわれたが、予ひずみと直角方向の引張りに対しては比例限度の上昇はみられたにもかかわらず、降伏現象はみられなかった。また圧縮試験については、バウシング効果の一部が時効によって消滅してひずみ時効硬化が起ったと発表している。著者らの1人は、各種の炭素鋼のバウシング効果が時効によって消滅する過程について研究し、この過程においても Cottrell 雰囲気は形成され、比較的炭素含有量が少なくバウシング効果が顕著でない場合には、予ひずみと反対の変形に対しても明瞭な降伏現象があらわれるが、炭素量が多くバウシング効果が顕著になると比例限度の上昇は見られるが明瞭な降伏現象は見られないことを多くの実験によって明らかにした。この現象は予ひずみ時に生じた方向性のある内部応力にもとづくもので、炭素鋼のバウシング効果そのもののあらわれにほかならないと発表している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。また同時にバウシング効果は予ひずみと反対方向にあらわれるばかりでなく、これとある角度をなす方向にもあらわれることを実験的に明らかにしていることを考えあわせると、Tipper の結果は炭素鋼のバウシング効果と密接な関係があるものと考えられる。本論文では、この関係を明らかにするために、予ひずみを加えた0.08%炭素鋼および0.21%炭素鋼のバウシング効果の異方性とこれらのバウシング効果が時効によって消滅する過程の活性化エネルギーとの関連性について実験的に研究した。

2. 実験 I 0.08%炭素鋼圧延板によるひずみ時効異方性実験

2.1 実験方法

実験に使用した厚さ 1.6mm の圧延鋼板の化学成分を表 1 に示す。この材料の強度および変形の異方性、時効異方性の有無を調べるために、素材から 200×100mm² の長方形試

表 1 化 学 成 分 (%)

C	Si	Mn	S	P
0.08	0.10	0.33	0.025	0.016

験片(大試験片と呼ぶ)を切り出し、シリコニット電気炉中で930°C 1時間箱詰焼なましを行なった。素材の長手方向を試験片の長軸にした。長軸方向に対してその軸が $\theta=0^\circ, 45^\circ$

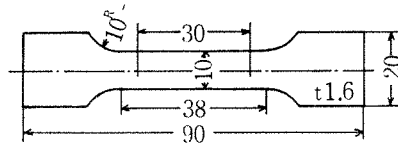


図 1 小 試 験 片

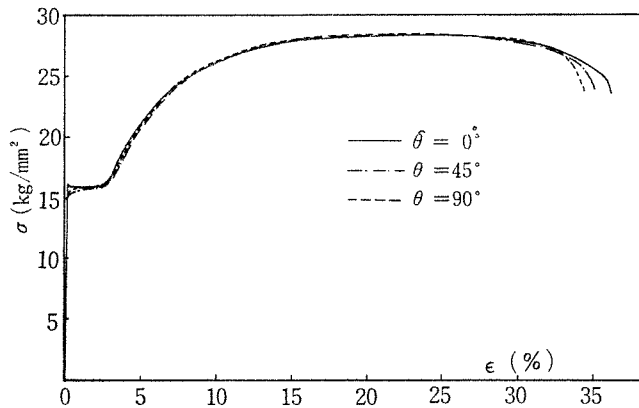


図 2 素 材 の 異 方 性 試 験

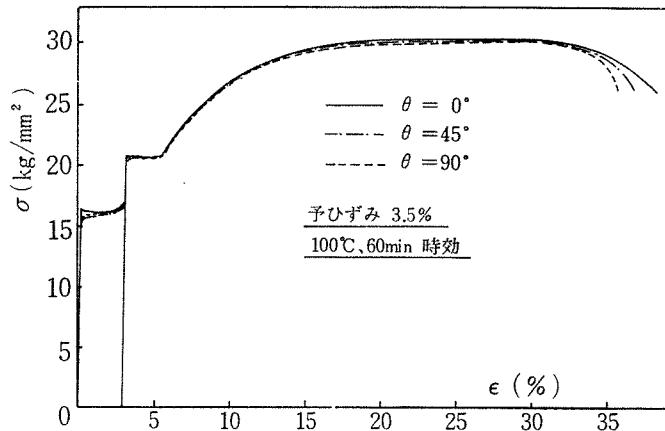


図 3 素材の時効異方性試験

90°をなすように図1の小試験片を切り出し、引張試験を行なった。その結果を図2に示す。この結果から応力—ひずみ曲線の異方性はないものと判断した。

次に前述の3方向に切り出した小試験片にそれぞれ3.5%の引張予ひずみを与え、100°C

60分の時効を行なった。その引張試験結果を図3に示す。これより時効異方性もないものと判定した。以上の結果から、この素材はこの実験の目的に合うものと判定して、本実験を行なった。

前述のように焼なましした $100 \times 200 \text{ mm}^2$ の大試験片を、斎藤⁽¹²⁾の実験にならって、特に一様なひずみを与えるように設計したくさびと球座を有するつかみを製作して、5tons オルゼン型万能試験機に取りつけて、試験片の長手方向に5%の引張予ひずみを与えた。その後、予ひずみ方向に対してその軸が $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ をなすように図1の小試験片を切り出した。切り出しには外形を高速精密切断機と立てフライス盤で切削し、手ヤスリで仕上げた。切削にあたって十分切削剤を使って冷却し、ヤスリ作業は冷水をかけながら行ない、極力加工中の時効および切削ひずみの発生を防いだ。これらの小試験片を $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 100^\circ\text{C}$ の各温度に3~100分の各時間油中で時効し、 0°C の水中に急冷して時効を止めた。油時効炉の温度誤差は $\pm 1.5^\circ\text{C}$ であった。実験を行なう時以外は試験片を 0°C に保った。応力—ひずみ曲線は差動変圧器を用いて X—Y レコーダに自記させた。それぞれの応力—ひずみ曲線から0.03%弾性限度 $\sigma_{0.03}$ と0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ をオフセット法によって求め、これらを予ひずみ最終応力 σ_0 で割った値 $\lambda_{0.03} = \sigma_{0.03}/\sigma_0$, $\lambda_{0.2} = \sigma_{0.2}/\sigma_0$ の変化から活性化エネルギーを求めた。 $\lambda_{0.03}$ および $\lambda_{0.2}$ はそれぞれバウシंगा効果の遷移軟化領域および永久軟化領域の時効硬化指数に相当する値で、 σ_0 で割って無次元化することによって素材強度の多少のばらつきの影響がさけられる。引張速度はいずれの場合もつかみ部で毎分1mmとした。なお実験中の試験片の温度は室温 ($25 \sim 30^\circ\text{C}$) であった。

2.2 実験結果

大試験片に5%の引張予ひずみを与えて得られた応力—ひずみ曲線と時効せずに引張った3方向の応力—ひずみ曲線を図4に示す。図から求めた $\lambda_{0.03}$ および $\lambda_{0.2}$ と予ひずみ方向となす角 θ との関係を図5に示す。 $45^\circ, 90^\circ$ 方向にバウシंगा効果があらわれ、それが角度が大きいほど顕著で、また永久軟化領域より遷移軟化領域の方が顕著であることがわかる。この結果は著者の1人の発表⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾と同じである。

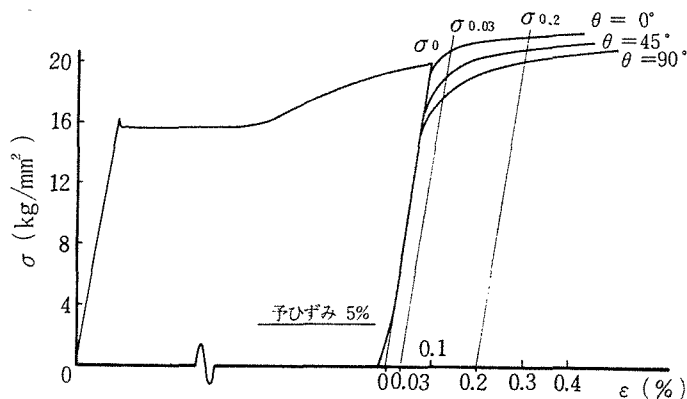


図4 5%引張予ひずみ材の異方性

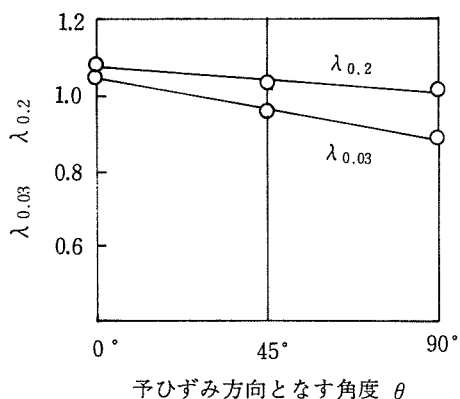


図5 5%引張予ひずみ材のバウシンガ効果の異方性

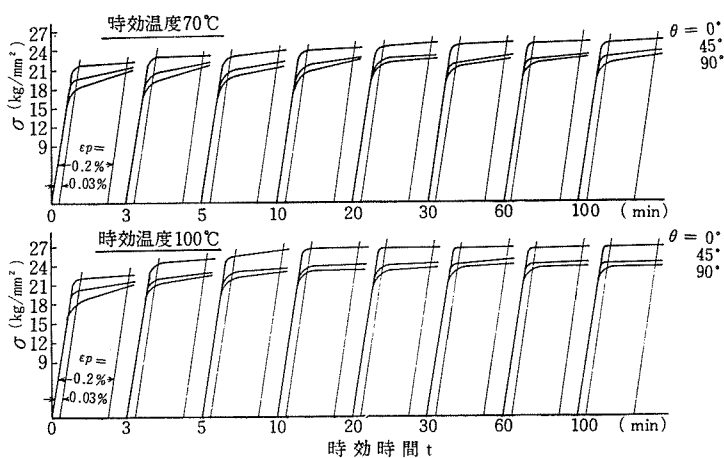


図6 時効による応力—ひずみ曲線の変化

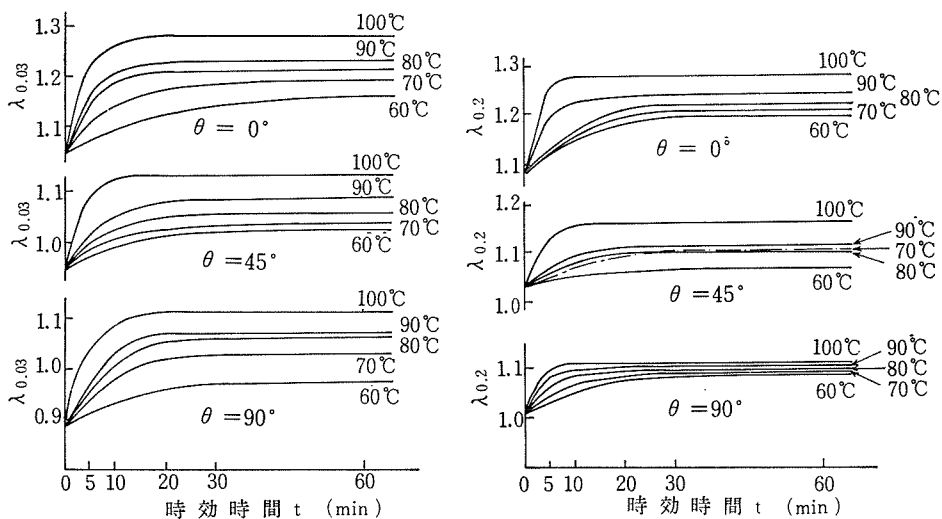


図7 時効による弾性限度 $\lambda_{0.03}$ および耐力 $\lambda_{0.2}$ の変化

時効終了後の小試験片の引張応力-ひずみ曲線の1例を図6に示す。曲線は時効時間が増すほど上昇しているが、60分以上ではほぼ一定になっていることがわかる。すなわち著者の1人が発表した⁽¹⁰⁾炭素鋼特有の第1段階の時効はこの低炭素鋼では60分で終了することがわかる。これらの結果から求めた $\lambda_{0.03}$ 、 $\lambda_{0.2}$ と時効時間との関係は図7のようになる。いずれも温度が高いほど時効時間につれての上昇が早く、これらの変化が一種の速度過程であることを示している。各温度ともその飽和値は異なるが、これを $\lambda(T)$ とし、この過程をある種の一次反応と考えると次の式が成立する。

$$\lambda(T) - \lambda = [\lambda(T) - \lambda_i] e^{-kt} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに λ_i は時効時間 $t=0$ における λ の値、 k はこの反応の速度定数である。各実験結果の $\log[\lambda(T) - \lambda]$ と時効時間 t との関係は図8のようになり、上式が成立していることがわかる。各温度とも同じ反応によって弾性限度および耐力の上昇が起るものとする、

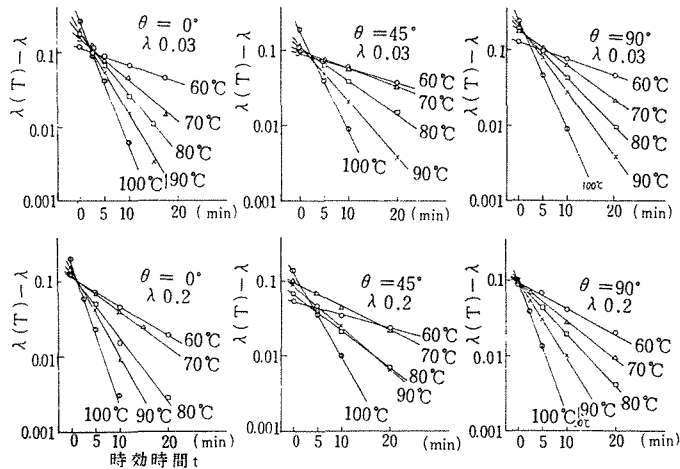


図8 時効時間 t と $\lambda(T) - \lambda$ との関係

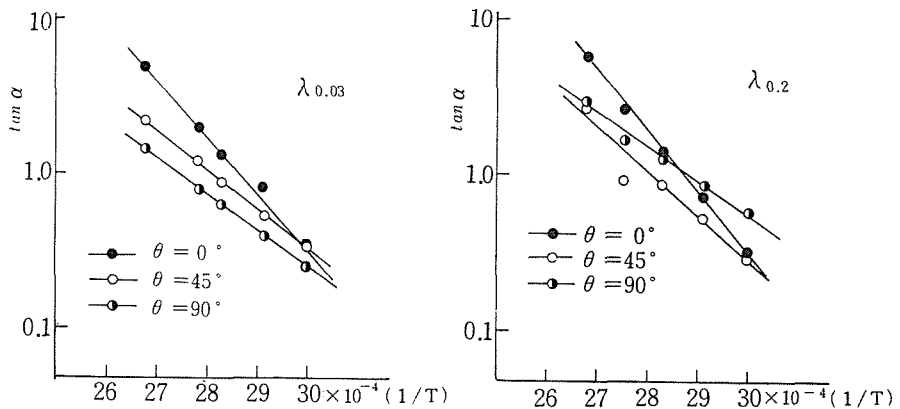


図9 $1/T$ と α との関係

$$k = Ce^{-\frac{E}{RT}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

が成立する。ここで c は定数、 T は絶対温度、 R はガス定数、 E はこの反応の活性化エネルギーである。 k は図8の各直線の傾斜 $\tan\alpha$ に比例する。図からそれぞれ $\tan\alpha$ を求めて、 $\log(\tan\alpha)$ と $1/T$ との関係を図示すると図9のようになり活性化エネルギー E を算出することができる。これから求めた活性化エネルギーを表2に示した。

表2 活性化エネルギー (cal/mole)

θ	$\lambda_{0.03}$	$\lambda_{0.2}$
0°	17,400	18,200
45°	11,600	14,000
90°	11,000	10,100

3. 実験Ⅱ 0.21%炭素鋼丸棒によるひずみ時効異方性実験

3.1 実験方法

実験Ⅰでは引張予ひずみを与えた後、それぞれ予ひずみ方向に対して $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の3方向に小試験片を切り出した。したがって小試験片には予ひずみ時に与えた応力のほかに、いかに注意してもある程度の切削による影響はまぬがれ難い。そこで実験Ⅰの結果の検定も兼ねて、予ひずみ後の切削工程を含まない時効異方性試験を行なった。すなわち低炭素鋼の薄肉円管試験片にねじりと引張りの組合せによる予ひずみおよび単純ねじりによる予ひずみをそれぞれ与えて時効した後、予ひずみ時のねじり方向と逆方向にねじったときの0.03%弾性限度および0.2%耐力の変化から活性化エネルギーを求める実験を行った。

ねじり試験には容量 1000kg—cm の振子計力器型ねじり試験機械を用いた。ねじり角

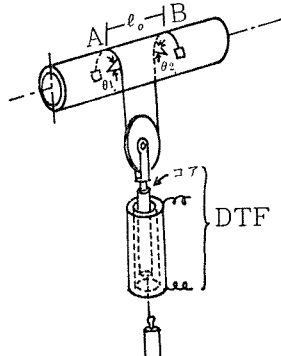


図10 ひずみ測定装置

は図10のように試験片の標点に細い糸をそれぞれ逆方向に巻きつけ、滑車を通して標点間のねじり角に比例した変位を差動変圧器のコアに与えることによって電氣的に測定しうるようにした。試験機械のトルクの指針軸にも細い糸を巻きつけ、この先端を差動変圧器のコアに結びつけて、トルク—ねじり角曲線をX—Yレコーダによって自記させた。

試験片の軸方向に引張荷重を加えるために、ねじり試験機械の軸受部分にスラスト軸受を取り付け、ねじによって軸受を試験片の軸方向に移動できるようにした。引張荷重の測定は弾性棒によ

った。弾性棒に4枚のひずみゲージをはりつけてブリッジを組み、あらかじめ5tons オルゼン型万能試験機で校正しておいた。

実験に使用した外径25mm炭素鋼丸棒の化学成分を表3に示す。この材料に変形に対す

表 3 化 学 成 分 (%)

C	Si	Mn	S	P	Al
0.21	0.28	0.35	0.020	0.018	0.05

る異方性があるかどうかをカタサ試験で調べた。素材から、その面が素材丸棒の軸に対して 90° (軸直角断面), 45° , 0° (軸平行断面) の 3 方向をなすカタサ試験片を切り出し、それぞれ 900°C 1 時間真空焼なましを行ない、各面に荷重 10kg でビッカース圧痕を作りその対角線長さ l_1 , l_2 を測定した。表 4 は各面に対して任意に 7 回ずつ押込んだ結果であるが、これからこの素材を焼なましした場合にはほとんど変形異方性がないものと判断してこの実験に使用した。

表 4 ビッカース圧痕の対角線長さ (μ)

断 面	軸 直 角 断 面		$\angle 45^\circ$ 断 面		軸 平 行 断 面	
	l_1	l_2	l_1	l_2	l_1	l_2
1	402	397	394	392	388	395
2	397	389	390	390	384.5	387
3	394	394	392.5	391	391	391
4	394	402	382	388	387	390
5	391	394	387	385	394	392
6	394	396	397	389	381	386
7	386	387	394	393	393	390
平 均	394.0	394.1	390.9	389.7	388.3	390.1

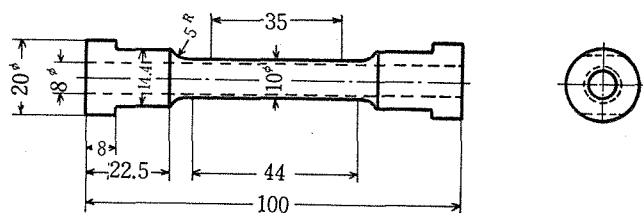


図11 薄肉円管試験片

この素材から図11に示す薄肉円管試験片を削り出し、切削ひずみを除去し組織を一様にするために、 900°C 1 時間の真空焼なましを行なった。予ひずみは、300kg の定荷重で軸方向に引張りながら (軸直角断面の引張応力 $\sigma_0 = 10.6\text{kg/mm}^2$, この値はこの焼なまし材料の下降伏点 30.5kg/mm^2 の約1/3である) ねじって試験片の円周方向に 5% のせん断ひずみを与えるもの、および単純ねじりで 5% のせん断ひずみを与えるものの 2 種類とした。予ひずみを与えたのち、それぞれ 5~100 分間 60°C , 80°C , 100°C の各温度の油中で時効し、 0°C の水中に急冷して時効を止めた。その後、それぞれの初めのねじり方

向と逆方向にねじった。この2度目のねじりの時にはいずれも引張荷重は加えない。試験片は実験の時以外は 0°C に保って時効を防いだ。引張—ねじり 組合せ予ひずみを与える場合、ねじり変形が進むとわずかではあるが試験片が伸びて引張荷重が減少するので、ねじりモーメントを加えるとともに引張荷重が一定になるように常に調節した。

3.2 実験結果

300kgの一定荷重で引張りながら試験片の円周方向に5%のねじりひずみを加えた時の軸直角断面あるいは軸平行断面の最終せん断応力 τ_0 （予ひずみねじり最終応力）は平均 14.2kg/mm^2 であった。また引張荷重300kgによる引張応力 σ_0 は 10.6kg/mm^2 （軸方向の伸びは標点距離を読み取り顕微鏡で測定した結果0.16%であった。よって断面積の変化は無視することにした。引張荷重300kgによるスラスト軸受部の摩擦モーメントは引張荷重が小さいので無視しうることを実験してたしかめた。）であるから、この組合せ応力予ひずみ最終時の主せん断応力方向は試験片の軸方向あるいは円周方向に対して $\angle 10.25^{\circ} \approx \angle 10^{\circ}$ 傾いていることになる。よって円周方向に単純ねじり予ひずみを加えてから、これを逆方向にねじる場合に主せん断応力方向を 180° 回転させたと称することになると、本実験の場合の組合せ応力予ひずみを加えてから、予ひずみ時のねじり方向と逆にねじる場合には主せん断応力方向を 170° 回転させたと言いえることになる。

この組合せ応力予ひずみを加えて除荷し、時効後、組合せ応力時のねじり方向と反対方向にねじった場合、すなわち主せん断応力方向を $\theta_{\tau} = 170^{\circ}$ 回転させてねじった場合に得

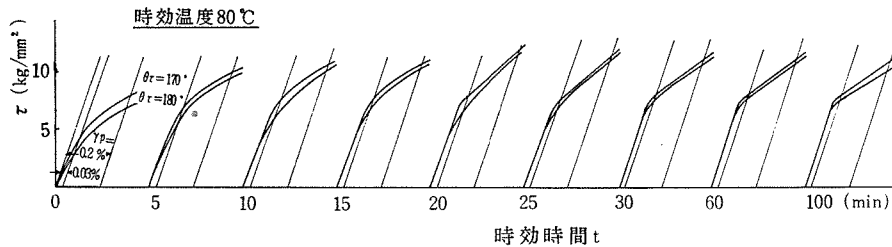


図12 時効による応力—ひずみ曲線の変化

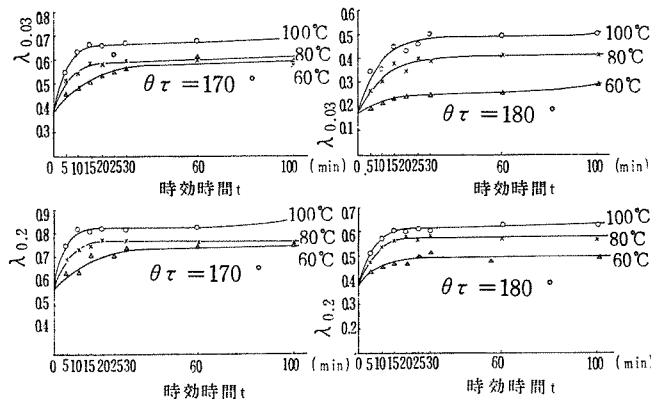


図13 時効による弾性限度 $\lambda_{0.03}$ および耐力 $\lambda_{0.2}$ の変化

られたせん断応力—ひずみ曲線と、予ひずみ単純ねじり方向に対して逆方向にねじった場合に得られたせん断応力—ひずみ曲線の1例を図12に示す。図は80℃時効の場合であるが、これから実験Iで行なったと同様に、0.03%弾性限度と予ひずみ最終応力との比 $\lambda_{0.03}$ 、および0.2%耐力と予ひずみ最終応力との比 $\lambda_{0.2}$ の変化を求めた。これを図13に示す。引張—ねじり組合せ予ひずみの場合には予ひずみ最終応力として、便宜上予ひずみねじり最終応力 τ_0 を用いた。

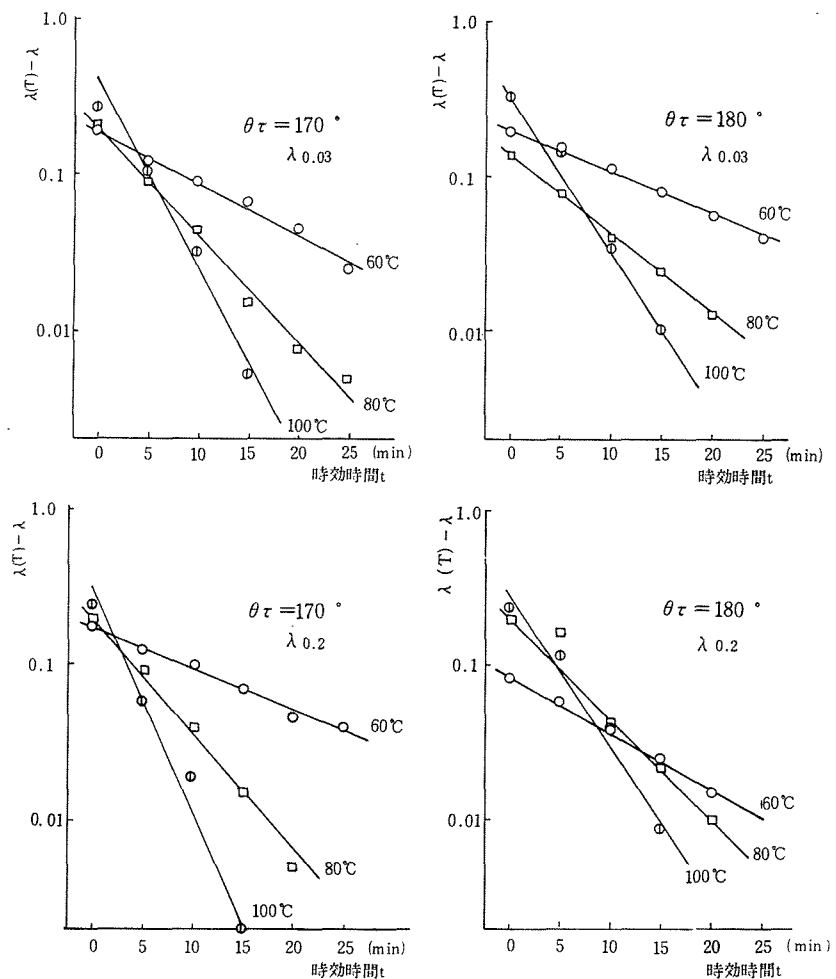


図14 時効時間 t と $\lambda(T) - \lambda$ との関係

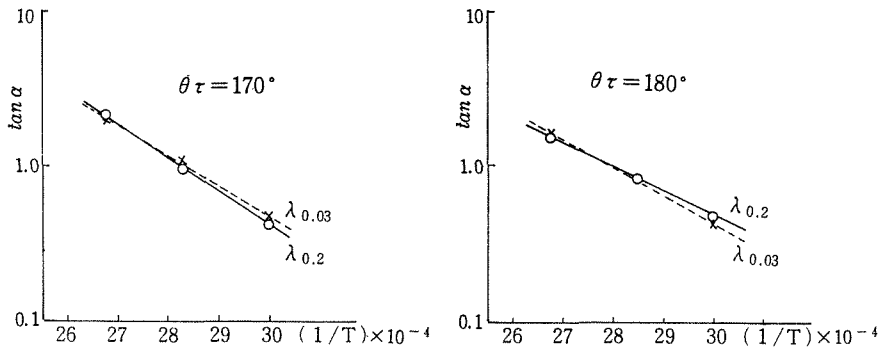

 図15 $1/T$ と α との関係

表 5 活性化エネルギー (cal/mole)

	$\lambda_{0.03}$	$\lambda_{0.2}$
$E_{P=300}$	9,400	9,700
$E_{P=0}$	8,700	7,700

この $\lambda_{0.03}$ および $\lambda_{0.2}$ の上昇過程を、実験Ⅰと同様にある種の一次反応の速度過程と考えて、2.2の(1)式を用いて $\log[\lambda(T) - \lambda]$ と時効時間 t との関係を図示すると図14のようになり、実験Ⅱでも(1)式が成立することがわかる。図14からそれぞれの直線の傾斜 $\tan \alpha$ を求めて $\log(\tan \alpha)$ と時効温度の逆数 $1/T$ の関係（図15）より活性化エネルギーを求めて表5を得た。表中 $E_{P=300}$ は組合せ応力予ひずみの場合 ($\theta_r = 170^\circ$) の活性化エネルギー、 $E_{P=0}$ は単純ねじり予ひずみの場合 ($\theta_r = 180^\circ$) のそれである。なお前述のようにねじり予ひずみ最終時の引張方向の伸びは0.16%で、予ひずみねじり5%に比較して非常に小さかったのでこれを無視することにした。

4. 考 察

低炭素鋼のひずみ時効異方性について、その性格とバウシニング効果との関連性を明らかにするために2つの実験を行った。実験Ⅰにおいては完全にはさげ得られないであろう試験片の切削の影響を検討する目的もあって実験Ⅱを行ったが、両実験の結果は次に考察するようにその本質においてまことによく一致しているので両者を合わせて考察する。実験Ⅰにおける切削の影響は極めて少なかったと言いうる。

4.1 時効による弾性限度および耐力の上昇速さについての異方性とバウシニング効果

低炭素鋼がひずみ時効硬化することは、まえがきに述べたように、多くの研究者によってすでに明らかにされたことであるが、図6および図12を見ると、弾性限度および耐力の上昇速さが方向によってかなり異なっている。図6では各温度とも両者の上昇が、 0° 方向

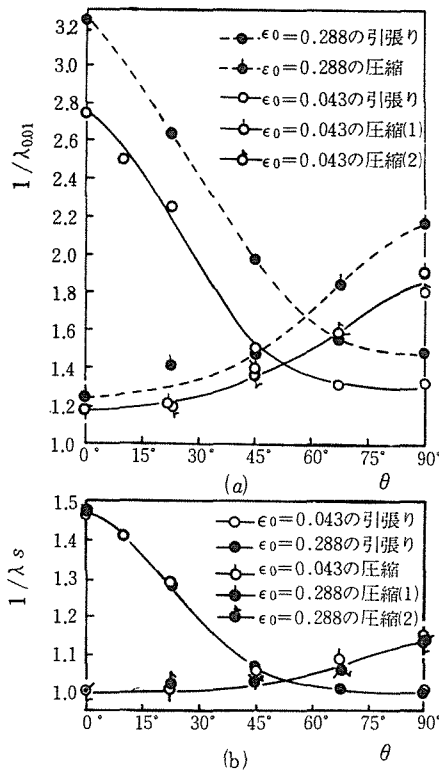


図16 バウシガ効果の異方性

除去されないものであることを考え合わせると、バウシガ効果の主たる原因である予ひずみ時に与えられた方向性のある転位にもとづく微視的内部応力がバウシガ効果の大きい方向ほど大きく時効によって容易には除去されないのに、バウシガ効果の小さい方向ほど内部応力も小さく、またそれが時効によって比較的容易に除去されるものと考えればこの実験結果の説明ができる。

4.2 時効による鋭い降伏現象の再現についての異方性

低炭素鋼の焼なまし材は一般に特有の鋭い降伏現象を示すが、予ひずみを与えるとそれが消滅し、これを時効すると再現することが知られている。本実験に使用した2種類の低炭素鋼はいずれも同様であった。実験Ⅰの素材についてはこれが図3に見られる。しかしこのひずみ時効による鋭い降伏現象の再現は、バウシガ効果の顕著な方向では、時効によってCottrellの雰囲気が形成されてもバウシガ効果の原因となる内部応力のために起らない場合があることを著者の1人が発表している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。本実験において、図6の0°方向では70°C、100°Cの両者とも10分の時効によって鋭い降伏現象の再現が見られるが、45°方向では、70°C時効では60分以後に、100°C時効では30分以後によく見られる。90°方向では100°C 100分の時効でようやく見られ70°Cでは100分の時効でもこれが見られない。また図12では $\theta_r = 170^\circ$ 方向では80°C 20分時効においてこれが見られるが、

では非常に早く短時間で一定になるが45°および90°方向は0°方向に比して相当遅く、90°方向は特に緩慢である。図12では実験された方向がわずか10°違っているにすぎないのに170°方向の方が180°方向より相当に速い。このことは著者の一人が発表したバウシガ効果の異方性によって説明できる。図16は圧縮予ひずみを与えた0.12%炭素鋼のバウシガ効果の異方性を示す実験結果である⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。 $\lambda_{0.01}$ および λ_s はそれぞれ0.01%弾性限度および耐力から求めたバウシガ効果係数で、その逆数はバウシガひずみの大きさに比例する。実験Ⅰの場合のような予ひずみと同種のひずみに対するバウシガ効果の異方性(図16では圧縮材の圧縮異方性)は予ひずみ方向から遠ざかるにしたがって大きくなり、45°ではその増加は少ないが90°では相当大きい。実験Ⅱの場合のような、予ひずみと反対方向のひずみに対するバウシガ効果(図16では圧縮材の引張り)は予ひずみと正反対(図12では $\theta_r = 180^\circ$)のとき最大で、それからわずかに方向が変わると急激に小さくなっている。

バウシガ効果は低温時効によって完全には

$\theta_r=180^\circ$ 方向では 80°C 100 分時効においてわずかに見られる。この時効による鋭い降伏現象再現の異方性も前節に示したバウシガ効果の異方性によってよく説明できる。

4.3 時効による弾性限度および耐力の上昇過程の活性化エネルギーの異方性

実験ⅠおよびⅡのいずれの結果によっても、時効によって弾性限度および耐力の上昇する過程はどの方向についてもある種の一次反応過程であることがわかった。そして前の2つの節で論じたように、バウシガ効果の異方性と密接に関連して、各方向の上昇過程に差がある。この上昇過程の活性化エネルギーは2つの実験の各方向に対して表2および表5のように求められた。実験Ⅰの 0° 方向 (E_0) が最大で実験Ⅱの $\theta_r=180^\circ$ 方向 ($E_{P=0}$) が最小である。

予ひずみをうけた低炭素鋼の低温時効によっては、予ひずみ時に発生した転位の再配列による回復および α 鉄中に固溶している炭素および窒素による Cottrell 雰囲気形成が起るはずで、いずれの場合にも転位にもとづく微視的な内部応力は解放され、バウシガ効果は一部消滅するはずである。しかし、回復の活性化エネルギーは自己拡散あるいはクリープのそれに匹敵し、相当大きいので、本実験における 100°C 60 分程度の時効によってはごくわずかしき起らないであろう。よって本実験の時効過程においては Cottrell 雰囲気形成が優先するものと思われる。

α 鉄中を炭素および窒素原子が拡散する活性化エネルギーについての研究は、現在までに非常に多く発表されている。例えば Wert⁽¹³⁾、川崎・泉および桜井⁽¹⁴⁾、藤田⁽¹⁵⁾らの多くは、時効によるかたさの変化、あるいは電気抵抗の変化によって活性化エネルギーを求め、その結果 20,400cal/mole および 18,000cal/mole と報じている。表2を見ると実験Ⅰの 0° 方向すなわち引張予ひずみを加えて時効後予ひずみと同方向に引張った場合の活性化エネルギーは 17,400cal/mole あるいは 18,200cal/mole と最も大きく求められ、上記各研究者たちの求めた α 鉄中における炭素および窒素原子の拡散の活性化エネルギーと非常によく一致している。このことはこの過程が著者らの予想通り Cottrell 雰囲気形成によるものであろうことを裏付けている。他の方向でも同様に Cottrell の雰囲気が形成されるはずであるのに他の方向ではいずれも活性化エネルギーがこの値より小さい。表2および5によると、4.1に述べたバウシガ効果の顕著な方向ほどこれが小さいので、この活性化エネルギーの減少もバウシガ効果と関係があるように思われる。実験Ⅰのバウシガ効果の異方性をあらわす図5中の $\lambda_{0.2}$ の変化と活性化エネルギーの変化を重ねて示すと、図17

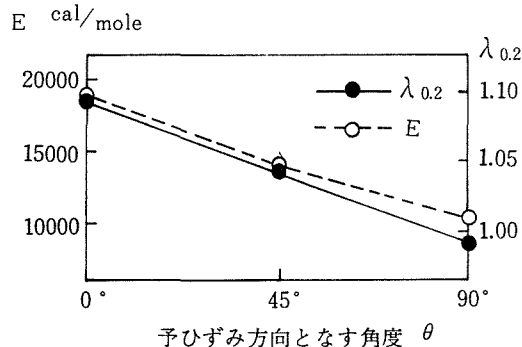


図17 バウシガ効果の異方性と活性化エネルギー

のように非常によく一致する。このことはバウシング効果の原因である転位の分布にもとづく方向性のある微視的的内部応力が、その方向にすべりやすい転位の炭素および窒素原子による釘付けを何らかの形で助けているものと推論される。その機構についてはなお研究する必要がある。

著者の一人が焼きなましした 0.55%炭素鋼試験片に 1.3%ねじり予ひずみを与え、時効後予ひずみと逆方向にねじった時の応力——ひずみ曲線から求めた活性化エネルギーは 19,000 cal/mole であった⁽¹⁰⁾。この値と今回著者らの求めた $E_{P=0}$ とは大きな相異がある。前の実験での 1.3%ねじり予ひずみでは降伏伸びがまだ完全に終了していない状態で除荷し、時効を行なっているのに、未降伏部分が残存していることの影響があらわれたためかと考えられる。また、予ひずみの大きさによってバウシング効果が変化するので、活性化エネルギーも変化するであろうと思われる。この点についてもなお今後の研究が必要である。

5. む す び

完全焼なましをして、あらかじめ変形異方性および時効異方性のないことをたしかめた 0.08%炭素鋼薄板に、特殊なつかみを用いて、一様な 5%引張予ひずみを与え、これからそれぞれ予ひずみ方向に対してその軸が 0°, 45°, 90°をなす小さな引張試験片を削り出した。切削にあたっては、切削油を十分用いて、切削ひずみおよび温度上昇の起ることをできるだけ防止した。これらの小試験片を 60°~100°Cの各温度に 3~100分間時効して引張試験を行ない、その応力—ひずみ曲線の変化および 0.03%弾性限度、0.2%耐力の変化をそれぞれ求めた。

さらにかたさ試験によって変形異方性のないことをたしかめた 0.21%炭素鋼丸棒で、薄肉円管試験片を製作し、引張—ねじり組合せ応力によって、その円周方向に 5%のねじり予ひずみを与えた後、60°C, 80°C, 90°Cの各温度に 5~100分間時効し、予ひずみ時のねじり方向と逆方向にねじってねじり応力—ひずみ曲線、0.03%弾性限度、0.2%耐力の変化をそれぞれ求めた。同じ材料の試験片に同じく 5%の単純ねじり予ひずみを与え、同じように時効した後、予ひずみ時と逆方向にねじって前と同じ測定を行い、両者を比較して、予ひずみ時の最大せん断応力方向の相違による実験結果の変化を求めた。

これらの 2 種類の実験から次の結論を得た。

(1) 時効による弾性限度および耐力の上昇速さは、時効後の変形方向と予ひずみ時の変形方向とのなす角が大きいほど緩慢である。

(2) 予ひずみによって消滅した鋼特有の鋭い降伏現象は、一般に時効によって再現すると言われているが、その現われ方に方向によって差異がある。時効後の変形方向と予ひずみ時の変形方向とのなす角が大きいほど、鋭い降伏の再現には、より高温でより長時間の時効が必要である。

(3) 時効による弾性限度および耐力の上昇過程は、各方向ともいわゆる一次反応の速度過程で、その活性化エネルギーは方向によって異なる。予ひずみと同じ方向の活性化エネルギーは 17,400 cal/mole および 18,200 cal/mole と求められ、この過程が Cottrell 雰囲気形成によって起るものであることが判った。しかし時効後の変形方向と予ひずみ方向と

のなす角が大きいほど活性化エネルギーはより小さく求められた。

(4) これらの各実験結果はいずれも予ひずみ材のバウシガ効果の異方性にもとづくものとして説明できる。すなわち、予ひずみ材のバウシガ効果はその変形方向と予ひずみ方向とのなす角が大きいほど大々顕著になることを著者らの一人が既に発表したか、そのバウシガ効果の原因となる微視的内部応力が大きいほど、時効による弾性限度および耐力の上昇が緩慢になり、鋭い降伏現象があらわれ難くなる。そしてこの方向性のある内部応力が、時効の時に、ある方向に迂り易い転位の炭素および窒素原子による釘付けを助けるために、バウシガ効果の顕著な方向ほど活性化エネルギーが小さく求められるものと考えられる。

(5) この研究結果から、低炭素鋼のバウシガ効果の異方性とそのひずみ時効による鋭い降伏現象の再現および弾性限度、耐力上昇の異方性とは密接な関係があることが明らかになった。

本研究の一部は昭和45年11月7日、日本機械学会山梨地方講演会で発表した。著者の一人加藤は現在石川島播磨重工業KKに勤務している。

この研究にあたり、日立電線KK在勤の佐藤強志氏、川崎製鉄KK在勤の清野芳一氏が当学部在学中卒業研究の一環としてこの実験の一部を手伝ってくださった。また大沢製作所在勤の島崎良助氏が山形大学工業短期大学部在学中著者らの研究室に在席して実験装置の製作、調整および実験を手伝ってくださった。また当学部大学院在学の武田武信氏には実験装置の製作、調整、実験さらに実験結果の整理討論、原稿の清書まで手伝っていた。当学部菊地新一技官が材料の調達から、論文完成まで一切にわたって努力してくださった。さらに当学部機械工場各位が実験装置の製作を担当してくださった。

これら多くの各位のご協力に対して深く感謝いたします。

文 献

- (1) J. R. Low, M. Gensamer; Trans. AIME, **158** (1944), 207.
- (2) H. Schwartzbart, J. R. Low; J. Metals, **1** (1949), 637.
- (3) C. A. Edwards, D. L. Phillips, H. N. Jones; JISI, **142** (1940), 199.
- (4) A. H. Cottrell; Proc. Phy. Soc., **60** (1948), 30.
- (5) A. H. Cottrell, B. A. Bilby; Proc. Phy. Soc., **32A** (1949), 49.
- (6) A. H. Cottrell, G. M. Leak; JISI, **172** (1952), 301.
- (7) D. V. Wilson, B. Russell; Acta Meta., **8** (1960), 36.
- (8) B. B. Hundy; Sheet Metal Industries, **31** (1954), 909.
- (9) F. Tipper; JISI, **172** (1952), 143.
- (10) 熊倉; 山形大学紀要（工学）, **7-2** (昭38-2), 327.
- (11) 熊倉; 日本機械学会誌, **70-584** (昭42-9), 1287.
- (12) 斎藤; 日本機械学会論文集, **20**—99 (昭29), 771.
- (13) C. A. Wert; Phys. Rev., **79** (1950), 601; J. Appl. Phys., **21** (1950), 1196.
- (14) 川崎, 泉, 桜井; 日本機械学会論文集, **23** (1960), 219.
- (15) 藤田; 合金の時効過程とその解釈; 日本金属学会 (1968).

The Anisotropy of the Strain Ageing and the Bauschinger Effect in Low Carbon Steel

Shigenori KUMAKURA, Akiyoshi ONUKI
and Koshiro KATO

Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering

After ageing low carbon steel specimens, given tensile, torsional or tension-torsion combined prestrains, the tensile stress-strain curves or the torsional stress-strain curves at various angles to the direction of prestrain were obtained, and from these curves 0.03% elastic limits and 0.2% yield strengths were determined and the activation energies in the rising process of these elastic limits and yield strengths were obtained. It is clarified from these results that the sharp yielding phenomena in low carbon steels recovered by ageing and the activation energies in the rising process of the elastic limits and yield strengths in various directions to the prestrain are very closely related to the anisotropy of the Bauschinger effect in the specimens caused by the prestrain.